

光学学报

高速结构光器件及其在光学成像与测量中的应用

马宇轩, 孟照魁, 黄宏旭, 孙鸣捷*

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 结构光场通常在空间分布上具有独特的光学特征, 在显微、成像、通信和测量等领域有广泛的应用。结构光器件的种类繁多, 制作材料和调制机理各不相同, 在调制速度、调制深度、空间分辨率等性能指标上存在较大差异。介绍了主要的结构光器件(液晶空间光调制器、数字微镜器件、硅基光学相控阵、LED阵列等)的工作原理及其性能特点, 分析了这些结构光器件各自的适用范围, 总结了结构光技术在显示投影、显微成像、鬼成像、三维成像、激光雷达等领域的典型应用情况。系统地展示了多种结构光器件的最新研究进展和前沿技术应用, 这将为相关领域的研究者提供参考。

关键词 信号处理; 结构光器件; 显示投影; 显微成像; 鬼成像; 三维成像; 激光雷达

中图分类号 O349

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1723001

High Speed Structured Light Devices and Their Applications in Optical Imaging and Measurement

Ma Yuxuan, Meng Zhaokui, Huang Hongxu, Sun Mingjie*

School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Structured light field usually has unique optical characteristics in spatial distribution, and is widely used in the fields of microscopy, imaging, communication, and measurement. There are many kinds of structured light devices with different materials and modulation mechanisms. There are great differences in the performance indicators such as modulation speed, modulation depth, and spatial resolution. This paper introduces the working principle and performance characteristics of the main structured light devices (liquid crystal spatial light modulator, digital micromirror device, silicon-based optical phased array, LED array, etc.), analyzes their respective application ranges, and summarizes the typical applications of structured light technology in the fields of display projection, microscopic imaging, ghost imaging, three-dimensional imaging, lidar, etc. This paper systematically shows the latest research progress and cutting-edge technology applications of a variety of structured light devices, which will provide reference for researchers in related fields.

Key words signal processing; structured light devices; display projection; microscopic imaging; ghost imaging; three-dimensional imaging; lidar

1 引言

相比于无线电波段和微波波段, 可见光(380~750 THz)的频率更高, 光谱范围更广, 这赋予了可见光更大的调制带宽, 意味着可见光所能携带的信息量上限要高于无线电和微波。光波的独立传播特性使得相遇的两束光能够互不干扰, 因此从不同点发出的光束在空间中的分布是可控的, 这构成了结构光场技术的基础。广义上结构光场是一种光的振幅、相位、偏振态等物理参数的空间分布经调制后的光场, 以此为基础的研究工作数量繁多, 研究成果也已经覆盖到人们的

日常生活。结构光场最直观的表现形式是二维平面上的强度分布, 因此最初结构光场的应用主要集中在显示投影领域。早在 20 世纪 60 年代, 美国的研究小组就提出了用于显示图像的液晶显示器(LCD)^[1]。1972 年 Meyer 教授^[2]研究钽酸锂材料的电光特性, 制成了用于光束偏转的包含 46 个通道的光学相控阵(OPA)。1982 年美国德州仪器公司研制了数字微镜器件(DMD), 该器件被广泛应用于投影仪设备中。随着新型电光材料的研究以及微机电系统(MEMS)技术的发展, 如液晶空间光调制器(LC-SLM)、发光二极管阵列、垂直腔表面发射激光器(VCSEL)、光栅光阀(GLV)等性能优

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金(61922011)、国家自然科学基金企业联合基金重点项目(U21B2034)

通信作者: *mingjie.sun@buaa.edu.cn

异的结构光器件被制作出来,在光场调制速度、调制深度、空间分辨率上有了长足的进步。科学研究和国防工业领域也越来越多地使用结构光器件进行研发和生产,这促进了全息成像、显微成像、鬼成像、无掩模光刻、激光雷达、人脸识别等技术的发展。

从结构光器件利用的光学效应角度来看,结构光器件的工作原理包括线性电光效应、二次电光效应、磁光效应、机械效应、声光效应、半导体的自电光效应、热效应等。可产生这些光效应的材料包括液晶、电光晶体、声光晶体、磁光材料、锆钛酸铅陶瓷(PLZT)等。结构光器件调制信息写入的方式可分成电寻址、光寻址和机械寻址。结构光器件的调制方式和光源的关系可以分为直接调制和外调制,其中LED阵列、VCSEL阵列直接产生调制光场,而DMD、LC-SLM、GLV等器件则是通过对入射光场进行外部调制工作的。

本文主要根据结构光器件采用的技术分类阐述了其基本原理和发展现状,分别总结了调制盘、LCD、DMD、VCSEL阵列、LED阵列、LC-SLM、PLZT光学相控阵、硅基光学相控阵、GLV器件的工作机制和性能指标,以为读者了解相关技术、开展相关领域研究提供参考。在器件结构原理的基础上,本文对不同器件在显示投影、显微成像、鬼成像、结构光三维成像、激光雷达、无掩模光刻等领域的应用进行介绍,梳理了各种器件和应用技术间的依托关系,旨在推动不同技术相互借鉴、帮助研究者更全面地了解和使用结构光器件。

2 结构光器件

基于输出光调制参量的不同,本文所介绍的结构光器件分为两大类:振幅调制型器件和相位调制型器件(单纯的偏振态调制器件应用较少,不再单独分类)。其中振幅调制型器件包括调制盘、LCD、DMD、VCSEL阵列、LED阵列等。相位调制型器件也被称为光学相控阵,包括纯相位液晶空间光调制器、PLZT光学相控阵、硅基光学相控阵、光栅光阀等。

2.1 调制盘

调制盘也称为编码板,是一种制作方便、成本低廉的机械寻址光振幅调制器件。调制盘的工作原理非常简单,将预先确定好的调制图案逐一刻在圆形盘片的不同位置,盘片的透光率随图案轮廓发生变化,入射光穿过调制盘即可投射调制图案的结构光场。使调制盘旋转,使其能在不同的调制图案间切换。对于各种应用领域,通常需要根据实际需求自由设计调制盘上所刻图案(图1)。19世纪80年代,德国工程师Nipkow发明了扫描物体的穿孔圆盘,并以自己的名字命名。1929年,英国工程师Logie^[3]使用Nipkow调制盘制作了扫描电视;近代军工领域,红外探测制导也会使用调制盘探测目标大致方位;现代光学实验中常用的光学斩波器也是一种典型的调制盘器件,使用光学斩波器可以测量激光器的输出光斑质量^[4]。调制盘的旋转速度可达120 r/s^[5],图案切换频率可达10 kHz量级,但是调制盘一次所能显示的图案数量有限,且只能按照预先的设计显示,不能灵活更改,这限制了其应用范围。

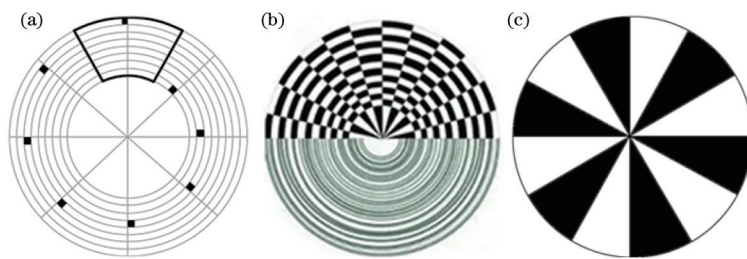


图1 不同领域的调制盘样式。(a) Nipkow调制盘;(b)探测制导调制盘;(c)光学斩波器

Fig. 1 Modulation disc styles in different fields. (a) Nipkow modulation panel; (b) detection guidance modulation panel; (c) optical chopper

2.2 液晶显示器

液晶是一种介于液态和固态之间的材料,具有良好的电光效应性能。LCD利用了液晶双折射效应和扭曲向列效应构成的混合场效应。将一定厚度的液晶夹在两个电极面之间,内层的液晶会分为许多平行于表面的薄层,每层分子呈同一取向,相邻层取向逐步转变,两个电极面的液晶分子主轴平行于表面但相互垂直。偏振方向平行于某一表面液晶分子主轴的入射光在另一表面出射时,其偏振方向会随液晶分子主轴发生相同的旋转,这就称为液晶的扭曲向列效应。液晶是一种双折射材料,扭曲向列液晶盒可以看作是一种单轴晶体,在垂直主光轴方向上对扭曲向列液晶盒施加电压,会改变液晶分子的排列取向即改变主光轴方

向,从而改变液晶盒的双折射效应强度,使出射光的相位发生改变。在扭曲向列液晶盒两侧加入偏振方向相互平行的偏振片,就构成了单个LCD像素单元,如图2所示。当没有对液晶盒施加电压时,入射光经过起偏器成为线偏振光,经过液晶时偏振方向随着液晶分子取向旋转,最后偏振方向与检偏器相互垂直,此时该像素点为暗态。当对液晶盒施加电压时,液晶分子取向将会发生变化,线偏振光经过液晶后变成椭圆偏振光,能够从检偏器出射,此时像素点为亮态。LCD作为图像显示器件,需要关注它对光振幅的调制特性,其相位调制特性可以忽略不计。

LCD的优势在于视角范围大、集成度高,目前已经能够生产出1 inch(1 inch=2.54 cm)包含1000个以上像

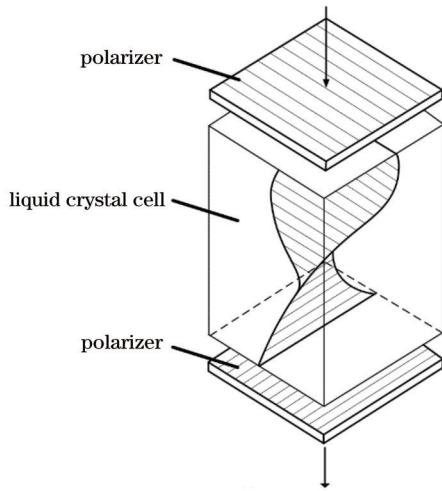


图 2 LCD 像素单元
Fig. 2 LCD pixel unit

素单元的 LCD^[6], 单块 LCD 的尺寸也能达到 2.3 m × 1.3 m。LCD 的对比度取决于背光源亮度以及液晶的透射率, 总体不如数字微镜器件。LCD 的响应速度主要受限于液晶材料特性, 即外加电场消失后, 液晶取向恢复原状态需要时间。液晶的响应时间主要受材料黏滞系数以及液晶层厚度的影响, 常见的薄膜晶体三极管有源阵列 LCD 器件的响应时间一般为 30~40 ms^[7]。2017 年 Fan 等^[8]报道了采用铁电晶体的液晶显示器件, 其最小开关时间仅为 59 μs。2019 年日本研究小组研究了新的电极排列方式, 提出了可以实用化的 LCD 方案, 其像素点的平均响应时间仅为 4 ms^[9]。通过瞬时提供超过液晶阈值电压的过驱动技术也可以加快 LCD 的响应速度^[10]。

2.3 数字微镜器件

数字微镜器件是基于 MEMS 技术制作的高速反射镜开关阵列, 是美国德州仪器公司的 Hornbeck 工程师于 1982 年开发的电寻址反射式结构光器件。DMD 由成千上万个排列整齐的反射镜组成, 表面涂铝可增加反射率。反射镜通常呈正方形, 边长为 16 μm, 相邻反射镜的中心距为 17 μm^[11]。每个反射镜下面沿对角线方向安装一个可以改变反射镜角度的铰链结构, 在静电力的驱动下能够使反射镜在两个偏转状态(12°和 -12°, 10°和 -10°)下切换^[12], 这样一个反射镜就构成了 DMD 的一个调制单元。其下面是电寻址所需的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 储存单元。DMD 调制单元结构如图 3 所示。

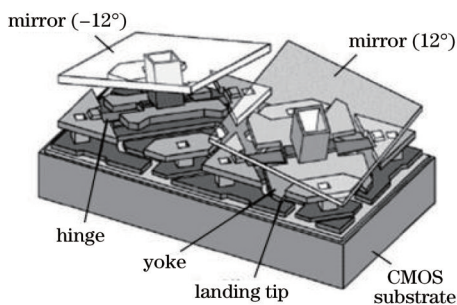


图 3 DMD 调制单元结构^[13]
Fig. 3 DMD modulation unit structure^[13]

依托现代成熟的集成电路制造工艺, DMD 的集成度非常高。商用投影仪内所使用的 DMD 器件的空间分辨率已经达到 3840 × 2160。相比于液晶器件, DMD 最大的优势就是响应速度, 由于单个微镜的体积小、重量轻, 状态切换时的转动惯量非常小, 因此 DMD 从完全开启到完全关闭用时约为 10 μs^[14]。目前德国 VIALUX 公司销售的 DMD 空间光调制器的空间分辨率为 1024 × 768, 调制频率最高可达 22.7 kHz^[15]。DMD 的另一大优势是高对比度, 在低调制速度的情况下, 对比度可以达到 20000:1。在投影光源合适的情况下, DMD 的整体亮度很高, 因为铝合金镜面反射系数较大且调制单元间距较窄, 器件的整体反射率可以达到 65%^[12]。DMD 的不足之处在于其微镜仅有两个偏转状态, 因此单次切换仅能实现对一位二进制数据的调制, 这限制了大动态范围调制图案的显示效率^[16]。为了实现投影仪所需的高位灰度阶次, 通常采用方波脉冲宽度调制的方式, 改变在一幅图像帧内不同调制单元照明时间的占空比, 进而使人眼感受到更多的亮度阶次^[17]。2017 年, 哈佛大学的研究小组为了抑制商用 DMD 产生的高频切换光噪声, 提出了一种外部硬件设计, 实现了长时间的静态结构光场^[18]。2019 年, Scholes 等^[19]研究了 DMD 表面衍射特征, 提出了以高光学效率生成高保真结构光场的方法, 实验结果表明该方法较传统方法提高了 20% 的光学效率。2020 年 Narag 等^[20]对 DMD 投射图像的拉伸失真现象进行了研究, 提出了一种利用椭圆狭缝衍射图样校正 DMD 失真的方法。2021 年 Zhang 等^[21]报道了一种基于时分复用和液晶双折射效应的增强 DMD 空间分辨率的方法, 使用一块 LCD 将一幅图像帧分两次错开角度投影, 两次投影交叠的位置的分辨率就变为原来的 2 倍, 但是这种超分辨率方法的缺点在于光路复杂导致光传输效率较低, 并且调制速度也受 LCD 器件限制。

2.4 垂直腔表面发射激光器阵列

激光亮度高、发散角小、单色性好、相干性好, 是非常理想的结构光场光源。大部分激光器的体积较大, 难以集成为阵列形式。VCSEL 是一种半导体激光器, 其基本结构是由两面分布式布拉格反射镜和其中的有源区组成, 如图 4 所示。VCSEL 的激光垂直于衬底面直接出射, 易于被制作成二维阵列的形式, 也非常适合与印刷电路板相结合, 这降低了设计工艺难度。因此 VCSEL 可以集成为性能优良的直接调制结构光器件使用。作为半导体器件, VCSEL 的整体尺寸可以做得非常小, 典型的单点直径为 2~10 μm, 激光腔厚度在 5~10 μm^[22]。相比于其他结构光器件, VCSEL 无论是从调制速度还是光场质量都要更优。2019 年, Shen 团队^[23]以光通信技术为需求, 仿真并研制了 3 dB 带宽高达 30.5 GHz 的砷化镓 VCSEL。2021 年 Li 等^[24]报道了一种利用一维衍射光学元件倍增 VCSEL 空间分辨率点个数的方法, 整体系统最终实现了 105° 的超大横向视场角以及大于 4000 个的空间分辨率点。但是目

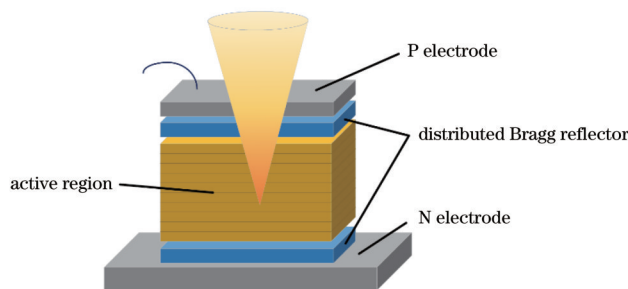


图 4 VCSEL 结构

Fig. 4 VCSEL structure

前 VCSEL 阵列只能整体点亮,其投射的结构光场样式在生产后就已固定,无法灵活更改。

2.5 LED 阵列

发光二极管基于 PN 结内电子和空穴复合释放能量的原理发光,其理论内量子效率接近 100%^[25]。无论是分立封装形式还是集成阵列形式,发光二极管的制作工艺技术都较为成熟,制作成本相对低廉,是一种理想的电寻址振幅调制结构光器件。由于是直接发光,发光二极管的调制深度优于 LCD 和 DMD 设备,调制速度也高于 LCD 几个数量级^[26]。2014 年,英国研究小组使用 MEMS 技术在硅衬底上生长氮化镓结区,制作了可独立寻址的微型 LED 阵列,单个 LED 的直径为 45 μm ,LED 数量为 100 个,电光调制带宽为 270 MHz^[27]。2017 年,吉林大学的科研人员针对微型 LED 的排列形式对输出光功率以及辐照均匀度的影响进行了研究,证明当 LED 排列间距符合最大平坦条件时能够获得最均匀的光场照度^[28]。2020 年, Lan 等^[29]制作了用于可见光通信的 2×5 发光单元微型 LED 阵列,单个 LED 的直径仅为 14 μm ,调制带宽最大为 615 MHz。当进一步提高 LED 阵列的集成数量时,由于控制信号过多,无法使用单独寻址方式,一般采用逐行扫描的方式,但这会降低 LED 阵列的整体调制速度。普通 LED 会包裹一层环氧树脂透镜封装,近似于点光源,有机发光二极管 (OLED) 整体表面发光,可以视作均匀面光源。由 OLED 阵列组成的显示设备目前已经广泛商用。2020 年 Joo 等^[30]报道了一种用于虚拟现实设备的 OLED 显示器,其分辨率达到了 10000 pixel/inch²。使用塑料基板, OLED 还可以制作柔性显示设备。2018 年韩国研究人员实现了 77 inch 的柔性 OLED 显示屏,可弯曲半径为 80 mm^[31]。

2.6 液晶空间光调制器

液晶空间光调制器按照对光参量的调制类型,可以分为振幅型、相位型以及振幅相位混合型空间光调制器,由于振幅型 LC-SLM 的基本原理和 LCD 较为相似,这里将主要介绍纯相位型 LC-SLM。

纯相位 LC-SLM 一般使用平行向列棒状液晶,主要利用液晶的电控双折射效应实现对结构光场的波前相位控制,相比振幅型 LC-SLM 有着更高的光学衍射效率^[32]。LC-SLM 的典型调制频率约为 5 kHz^[33],驱动阈值电压范围为 5~10 V。为解决普通向列液晶调

制速度较慢的问题,铁电液晶^[33]、双频驱动液晶等新型液晶材料被逐渐开发利用。2006 年, Linnenberger 等^[34]设计了一种 1×12288 空间分辨率的 LC-SLM,其调制单元间距为 1.6 μm ,通过将背板电压从 5 V 提高到 13 V,液晶弛豫时间降低到了 24.8 ms。同年, Xun 等^[35]报道了一种过驱动控制算法,将液晶空间光调制器的上升时间从 400 ms 缩短到了 71 ms。Yan 等^[36]于 2011 年基于蓝相液晶材料制成空间光调制器,实现了亚毫秒量级的响应时间和 40% 的衍射效率。向列液晶空间光调制器的响应时间与向列液晶盒厚度成正比^[37],2013 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出了优化液晶盒厚度与响应时间关系的方法^[38]。当液晶空间光调制器的调制单元密度较大时,晶体间的黏性导致相邻调制单元间的非线性关联效应突显出来^[39],导致实际光束偏转效果较差, Harris^[40]提出了相位调制系数优化方法,提高了扫描效率。

2.7 掺镧锆钛酸铅光学相控阵

PLZT 材料是一种具有压电、电光、电致伸缩特性的透明陶瓷晶体,具有较大的二次光电系数,成为相位调制型结构光器件的热门研究材料^[41]。PLZT 光学相控阵一般采用电压驱动的方式,电压会导致 PLZT 材料的折射率发生变化,进而使光程发生变化,最终改变出射光相位。PLZT 相控单元的相位延迟量与电压的平方呈线性关系。PLZT 电光材料作为相控阵材料比液晶材料的响应时间更短,但存在驱动电压高、集成度低等问题。有研究表明厚度为 350 μm 的 PLZT 相控单元达到 2π 的相位变化需要的驱动电压为 318 V,响应时间为 1 μs ,该研究使用了两片 PLZT 光学相控阵列级联技术,使两片相控阵的光束偏转角度相互补充,减少了所需的驱动电极数目^[42]。为了减小 PLZT 材料厚度,中国科学院上海光学精密机械研究所的董作人等^[43]提出了一种电极上下分布的横向 PLZT 相控单元结构,该结构在相同驱动电压下提高了材料内电场强度,并且保证了足够的相位变化。

2.8 硅基光学相控阵

硅基光学相控阵是近年来较为热门的新型相位调制结构光器件,它的出现基于硅光子集成技术的成熟。硅光子集成技术依托在硅基板上通过掩模光刻腐蚀等 MEMS 技术制作微米级尺度的激光器、相位调制器、光栅、光波导、波分复用器等光学元件,使得整套光学

系统的体积大大减小,具有极大的发展前景。硅基光学相控阵是典型的相位调制型结构光器件,入射光通过光纤耦合进器件,首先经过分束器分成等功率的多条光路,然后经过相位调制区输出结构光场^[44]。硅基光学相控阵一般采用硅掺杂材料的热光效应进行相位调制,受热场的传播速度限制,硅基光学相控阵的响应时间一般都在微秒量级。北京大学的 Zhao 等^[45]基于硅的等离子色散效应,提出了一种 32×32 调制单元数的硅基光学相控器件设计,其理论响应时间可以达到纳秒量级,但是调制效率较低。美国麻省理工学院的研究人员于 2013 年设计了空间分辨率为 64×64 的硅基相控阵芯片,整体面积仅为 $576 \mu\text{m} \times 576 \mu\text{m}$,调制单元大小为 $3 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$,厚度仅为 $0.22 \mu\text{m}$ ^[46]。该课题组采用行列电压驱动的 8×8 调制单元硅基光学相控阵,使用 N 型掺杂硅作为热光效应材料,实现了较高的相位调制效率,该器件达到 π 相移所需的功率为 8.5 mW 。2015 年,Abediasl 等^[47]制作了调制单元数为 8×8 的硅基光学相控阵芯片,每个调制单元不仅集成了热光调相器,也集成了热光幅度调制器,实现了相位-幅度混合调制,该器件实现 π 相移所需的功率为 14.2 mW ,单个调制单元尺寸为 $3.55 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,单元间距为 $5 \mu\text{m}$ 。2020 年 Poulton 等^[48]制作出了高达 8192 路可独立寻址的光学相控阵。

2.9 光栅光阀

光栅光阀最早由美国斯坦福大学的 David Bloom 制作,利用 MEMS 技术在硅基板上生成氮化硅材料的平行条带,条带上表面敷铝以提高反射率,在条带下表面和对应基板位置上分别制作电极,这些条带约 $100 \mu\text{m}$ 长, $3 \mu\text{m}$ 宽,厚度仅为 125 nm 左右,这些条带两端固定在硅基板上,中部拱起悬空,与基板间隔 650 nm ^[49]。当没有加驱动电压时,所有条带都处于拱起状态,GLV 整体作为一个平面反射镜;当给两电极施加电压后,条带会受到库仑力的影响向下移动,从而使表面形成交替凹凸的光栅结构,如图 5 所示。GLV 的驱动速度取决于库仑力大小以及空气间隙厚度等因素,调制条带的切换响应时间典型值为 20 ns ^[49],优于其他材料的空间光相位调制器。2012 年报道了一个含有 8192 路光栅单元的 GLV 器件,该器件在 $350 \sim 450 \text{ nm}$ 波长下工作,刷新率为 250 kHz ^[50]。2015 年 Murthy 等^[51]提出了基于 GLV 的投影仪设计方案,但是所用的 GLV 器件只是一维阵列,需要添加机械扫描装置才能实现二维图像显示。2019 年美国科罗拉多大学的研究人员开发了用于波前整形的 1×1088 条带的 GLV,其切换频率为 350 kHz ^[52]。

2.10 其他

磁光空间光调制器基于磁光效应工作,线偏振光受磁光调制,偏振方向发生改变,出射光经过检偏器后光强度发生变化。磁光空间光调制器的响应时间较短,约为 15 ns ^[53],但是受磁场泄漏的影响,调制单元尺寸一般不小于 $1 \mu\text{m}$ 。2010 年日本研究人员开发了一款用于显示全息三维运动图像的磁光空间光调制器,

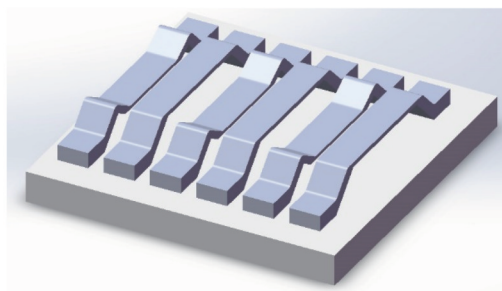


图 5 光栅光阀结构

Fig. 5 Grating light valve structure

使用自旋转开关技术避免了相邻调制单元的磁场串扰问题,空间分辨精度为几百纳米,驱动频率为几十兆赫兹^[54]。微通道板是一种由大量电子倍增管组成的光电器件,1985 年 Schwartz 等^[55]研制了电寻址微通道板空间光调制器,其响应时间在毫秒量级。利用多量子阱材料对光的吸收效应,可以制成光寻址振幅调制的自电光效应器件,其开关时间为皮秒量级^[56]。除上述器件外,还有声光调制器件以及基于表面等离子体激元效应的集成光子器件,这些器件产生的结构光场的空间尺度较小,在集成形式上不能满足当前应用需求,本文不予详述。

3 结构光场的应用场景

3.1 显示投影

显示设备是信息化时代不可缺少的部分,LCD 是目前发展最成熟、应用最广泛的显示器件,OLED 器件则后来居上,2019 年中国面板显示市场中 LCD 占市场份额高达 78%,而 OLED 器件则占约 20%。由于 LCD 需要背光源、配向膜等组件,LCD 的可视角度要小于 OLED。OLED 的对比度是 LCD 的 3~5 倍,响应速度是 LCD 的上千倍,OLED 还有更低的功耗和更大的色彩范围^[57]。但是,目前 OLED 的使用寿命较短,良品率不高,相信随着技术的不断发展,OLED 器件将会在显示器件领域全面取代 LCD。

投影技术是典型的振幅调制结构光技术,投影技术的核心器件有三种,分别是 LCD、硅基液晶板(LCOS)和 DMD。LCOS 可以视为 LCD 的变种,二者的区别有:1) LCOS 将液晶材料附着在硅基板上,而传统 LCD 使用的是玻璃基板;2) LCOS 投影仪一般为反射式光路,而 LCD 投影仪为透射式光路结构。因此 LCOS 投影仪的亮度要高于 LCD 投影仪,功耗更低。DMD 投影仪的原理是:投影灯泡发射出的光通过一个高速旋转的色轮分成红绿蓝三基色并被投射到 DMD 芯片上,再经反射,最后经镜头成像于投影屏幕上。Digital Projection 公司于 2018 年发布的型号为 INSIGHT Laser 8K 的 DMD 投影仪的像素数目高达 7680×4320 ,对比度达到了 20000:1。2019 年 Syndiant 公司推出的一款 LCOS 投影芯片的像素数目为 3840×2140 ,像素尺寸仅为 $3.2 \mu\text{m}$,对比度为 300:1^[58]。但是,有研究指出了 LCOS 投影仪具有潜在的散

热问题^[59]。微型LED具有体积小、亮度高等优点,目前也被用于投影设备研究中。2016年中国科学院研制出了可以用于投影领域的微型LED阵列,其像素数目为 320×240 ,单个像素尺寸为 $80 \mu\text{m}$,像素间距为 $20 \mu\text{m}$,单个像素功率最高达到了 $326.4 \mu\text{W}$ ^[60]。GLV器件也可以用于投影仪,2002年报道的一种GLV器件由6000多条氮化硅条带组成,每6条组成一个像素单元,可以以60 frame/s的速度投射 1080×1980 像素的图像,图像对比度最高达4000:1^[61]。2009年,日本研究人员开发了一种高空间分辨率宽色域的GLV投影仪,其像素数目为 7680×1080 ,对比度高达30000:1,显示帧率为每秒240幅^[62]。

3.2 显微成像

显微成像是人类观察生物细胞、矿物质结构的重要手段,常见的光学显微镜受到衍射效应的影响,存在极限分辨率,可见光范围内的极限分辨率约为200 nm。结构光照明显微成像(SIM)技术可以得到超过衍射分辨率极限的图像,其空间分辨率可以达到100 nm量级,并且有较高的成像速度,近年来受到科研人员的大量关注。

最早将结构光照明和显微成像结合起来的是牛津大学Neil教授团队^[63]在1997年的研究,该研究将仅含有单一空间频率的网格图案投射到物体上,实现了对物体的光学切片显微成像,采用的结构光器件是一片40 line/mm的光栅掩模板。2000年Gustafsson教授^[64]从理论上系统地分析了二维SIM理论,2005年他又在原来的基础上提出了非线性SIM理论,进一步将分辨率极限提高到了49 nm^[65]。2009年研究人员将空间光调制器引入SIM技术中,实现了动态成像,该研究使用硅基铁电液晶SLM生成调制图案,成像帧率仅为每秒11幅,成像精度为100 nm^[66]。2018年,北京大学的Huang等^[67]利用铁电液晶SLM,实现了空间分辨精度为88 nm、成像帧率为每秒188幅的SIM。同年,Guo等^[68]通过交叉重建方法以及掠入射结构光SLM实现了SIM成像,空间分辨率为 512×128 ,成像帧率为每秒266幅。2013年,DMD器件也被应用至SIM技术中,Dan等^[69]使用 1024×768 空间分辨率的DMD实现了每秒20幅的光学切片成像。2019年,Descloux等^[70]采用图像分割的方式,使用DMD器件同时对8个物平面进行成像,成倍提高了三维显微成像的速度,该方法可以在50~100 ms内进行三维成像^[70]。2021年,Liao等^[71]讨论了在SIM技术中使用DMD器件时双光束干涉方法与三光束干涉方法的效果,发现双光束干涉减少了图案移相次数,适合动态成像,而三光束干涉方法则适用于三维显微成像。除了上述结构光器件,2019年Franch等^[72]报道了一种基于 8×8 LED阵列的SIM系统,其LED尺寸为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$,间距为 $10 \mu\text{m}$,这种方法比常规结构光器件产生的空间分辨率点尺寸更小。2020年有学者提出了基于光子芯片的二维SIM系统,该系统抛弃了传统的空间结构光路设计,而使用光子芯片作为载物台直接照明物体,通过芯片上的光

波导阵列投射图案,显著减小了整个系统的占地面积,并且提高了SIM系统的成像分辨率^[73]。

3.3 鬼成像

鬼成像也称关联成像,关联成像不直接接收物体发出的光,而是将成像光路分为两臂:其中一臂为成像臂,相干光透过物体时受到调制,最终被光电探测器接收;而另一路参考臂上的相干光则直接入射到另一个光电探测器,作为参考输入。采集到两路光束信息后,通过对两路光束进行关联操作即可重构物体信息^[74]。鬼成像技术被提出来的初期,是采用激光照射旋转的毛玻璃生成不同的激光散斑作为相干光场,此时的成像分辨率和成像速率主要取决于相机的性能^[75]。后来鬼成像系统逐渐由双光路系统演变为单光路的单像素成像系统,所使用的结构光器件也越来越多样。

2015年Shi等^[76]提出了根据偏振方向分解检测的偏振鬼成像技术,并使用像素数目为 1024×768 的LCD进行了实验,证明了偏振鬼成像技术更适用于区分不同表面反射率物体。2016年长春大学的Song研究团队^[77]使用LCD投影仪显示伪随机图案照明物体,实现了静态物体成像。2019年Zhang等^[78]利用LCD实现无透镜单像素成像系统,该系统没有透镜引入像差并且结构紧凑,厚度仅为2.48 mm,适合作为紧凑型扫描仪,但是完全采样所需的成像时间约4 h。DMD器件首次应用到鬼成像技术中是在2006年,美国的Takhar团队^[79]使用DMD结合压缩感知技术实现了 64×64 像素的成像系统。2013年英国Sun研究团队^[80]使用4个单像素探测器对DMD投射的结构光进行4通道关联成像,分别获得了物体上下左右4个角度的像,并将其合成为物体的三维图像。2016年Phillips等^[81]使用DMD实现单像素成像,其系统仿照眼睛视网膜的排列结构进行采样,成像分辨率为 128×128 ,DMD调制频率为16.38 kHz,单幅成像用时0.5 s。2017年,暨南大学的Zhang等^[82]提出基于傅里叶频谱实现单像素成像的技术,并通过20 kHz调制频率的DMD器件进行结构光投影,实现了每秒10幅的成像速率。因为光学相控阵的调制速度可以超过DMD器件,2017年日本东京大学Komatsu等^[83]通过在磷化铟上集成光波导相控阵,实现调制频率达到1 MHz的计算鬼成像,但该系统仅有 1×8 的空间分辨率。2019年该团队又在先前研究的基础上使用硅基光学相控阵实现了像素数为 1×128 的高速鬼成像^[84]。2019年北京航空航天大学Li团队^[85]报道了使用光学相控阵实现随机散斑照明的高速鬼成像,其OPA调制频率可达到GHz量级,成像速度达到了每秒2000幅。基于LED的纳秒级别响应时间以及LED阵列结构与Hadamard调制矩阵的对应关系,北京航空航天大学Huang等^[86]在2022年实现了压缩采样情况下每秒25000幅的单像素成像帧率,所使用的结构光器件是发光单元数为 32×32 的LED阵列,该器件最快可以达到12.5 MHz的调制速率,远超过传统的DMD、LCD、LC-SLM等器件。

3.4 结构光三维成像

结构光三维成像技术是使用经过编码后的结构光场照射物体表面,通过成像相机记录经不同物体表面高度调制后形变扭曲的编码图案,再通过计算图案变形量反解物体三维轮廓信息的实用性技术。根据所使用的结构光场编码策略的不同,可以将其分为时间编码、空间编码以及直接编码。根据投射光场图案的形式,可以分为散斑编码、二进制编码和相位编码。目前较为热门的研究方向是相位编码形式的结构光三维成像,也称为条纹投影轮廓术^[87]。

早在1970年,Meadows等^[88]就使用莫尔条纹照射物体,对物体三维轮廓进行成像,其采用的结构光器件是1 line/mm的一维光栅,该器件同时用作调制和解调。1983年,日本的Takeda教授^[89]提出了傅里叶变换轮廓测量法,使用一个300 W幻灯机向物体投射150 line/inch的正弦光栅,获得了比传统莫尔条纹投影方法更高的灵敏度。1984年,Srinivasan等^[90]提出了相位投影轮廓法,使用激光源照射旋转的偏振干涉器件,向物体投射相位周期变化的条纹,三维成像在表面高度上的分辨率达到了10 μm 量级。2003年,Huang等^[91]使用DMD器件实现了实时动态三维成像,DMD向物体循环投射红绿蓝3幅正弦条纹图案,相邻两幅图案有120°相移,一个投射周期用时约为10 ms,成像帧率达到了每秒16幅。2006年,Zhang等^[92]在以前的基础上优化了三维重建算法,在每帧包含532×500个像素数情况下实现了每秒40幅的成像速度。2004年Griesser等^[93]报道了一种基于LCD投影仪的3D相机,其LCD像素数目为1024×768,成像速率为每秒10~25幅。为了满足高速成像的需求,2010年Gong等^[94]优化了傅里叶变换轮廓测量所使用的结构光场图案,只使用DMD投影仪的二进制模式投射离焦结构光场,因此光场的调制速度直接等于DMD器件的切换速度,最终达到了每秒4000幅的三维成像速率。同年Grosse等^[95]使用LCOS空间光调制器向物体投影,并通过两个角度记录物体反射的全息信息,计算得到了物体的三维信息,但是该系统成一次像所需的时间为6 s。2011年,Wissmann等^[96]将一系列条纹图案刻在调制盘上,使用类似于斩波器的低成本高速结构光投影硬件,实现了200 Hz的投影频率以及每秒20幅的三维成像速率。2014年Heist等^[97]报道了一种基于LED阵列的三维成像技术,采用了9组(3个LED作为1组)LED组成尺寸为136 mm×136 mm的LED投影阵列,共可以投射9种不同的非周期正弦条纹,投影帧率为3000 Hz,成像速率为每秒330幅。2015年,德国研究人员对比了两种用于高速三维成像的投影技术,指出:激光散斑投影模式总光通量更高,但成像精度较低,适用于高速非白色大体积物体测量;LED阵列投影成像精度取决于阵列的空间频率,但总光强较低,适于小体积测量^[98]。2018年美国普渡大学的研究人员使用高速转动的光学斩波器实现每秒10000幅的动态三维成像,由于斩波器投射条纹的速度与条纹数量没有关系,

因此可以在保证精度的情况下通过提高转速增加成像速度,静态成像像素数目为1024×1024,动态成像像素数目为512×512^[99]。同年,南京理工大学的Zuo等^[100]提出了微傅里叶变换轮廓测量法,实现了20 kHz的结构光场调制频率以及每秒10000幅的三维成像速度。2021年,Li等^[101]报道了一种基于VCSEL的光束扫描器件,可以以100 kHz的频率扫描46°×36°的视场,基于该器件实现的结构光深度传感系统,能够在35 cm处以每秒10幅的成像速度获取20×500像素数的三维图像。通过使用更好的相机,该系统的像素数目可以达到100×500,成像速率有望达到每秒20幅。

2017年浙江大学的Huang等^[102]提出了一种偏振态编码结构光三维成像技术,使用了空间分辨率为1024×768的LCD投影仪对结构光场的偏振态进行调制,相较于传统只调制光强的方法,偏振态编码结构光三维成像技术提高了成像系统面对复杂环境时分辨物体的能力。2020年,Zhu等^[103]也使用DMD投影仪配合偏振片向物体投射多幅偏振编码结构光场,提出了相位图像估计方法,减小了传统结构光场散焦造成的干扰,提高了边缘检测的鲁棒性;2021年该团队针对结构光三维成像动态范围较小的问题,提出了使用LCD投影仪投射偏振增强条纹图案的方法,该方法相比使用传统投射图案获得了更高的对比度,有利于提高三维成像精度^[104]。

3.5 激光雷达

激光雷达是一种利用飞行时间法测量环境物体相对距离的主动探测技术^[105],其空间分辨率高,有较强的抗干扰能力,能够全天候工作,受到科研人员的广泛关注。激光雷达主要由发射模块、接收模块和信号处理模块三部分组成。当工作时,发射模块向测量方向发出光信号,接收模块响应反射回波并通过飞行时间解算测量方向的相对距离,通过在多个不同方向分别进行测量,就可以重建三维周边环境^[106]。激光雷达按照其成像方式可以分为扫描式和面阵式成像。传统的扫描式激光雷达使用机械旋转的方式实现对不同测量角度的扫描,整个激光发射装置随着机械装置在步进电机的驱动下旋转,这种方式原理简单,但是成本较高、体积大、旋转部分稳定性较差。基于结构光器件,可以通过衍射的形式实现光束的偏转扫描,从而避免复杂的机械装置。

2017年Smith团队使用DMD实现了高速高效率的离散光束转向,并以此为基础搭建了DMD扫描激光雷达,DMD器件的每个调制单元为二进制控制,使DMD的整体衍射效率低于10%^[107],该团队提出了一种在DMD调制单元状态切换的过渡时间内照明的方式,实现了更高的衍射效率,使用0级衍射条纹的最大探测距离为120 cm,使用±2级衍射条纹时的最大探测距离为40 cm,最大视场角为48°,扫描速率为每秒3340点,在1 m范围内的测量精度小于1 cm^[108];2020年,该研究团队利用角度空间光调制技术改进了DMD光束扫描激光雷达,该系统有44°的最大视场角,

1 m 的最大探测范围,每秒 1000 点的扫描速率,实时成像速度达到了每秒 7.8 幅^[109]。

使用光学相控阵实现激光束的偏转扫描是激光雷达的另一个发展趋势。2009 年,Engström 等^[33]使用铁电晶体作为液晶材料提高了相控阵的响应速度,响应时间为 200 μs ,光束偏转范围为 18° 。2017 年 Wu 等^[110]将两片一维液晶相控阵级联,实现了在 0.19° 范围内高达 84.7% 的偏转效率,实际偏转角度误差仅为 0.29° 。2017 年,美国麻省理工学院的 Poulton 等^[111]将激光雷达发射和接收模块集成在硅基光学相控阵上,使用调频连续波的信号调制方式,实现了 $46^\circ \times 36^\circ$ 的扫描范围,在 2 m 的探测范围内,探测精度为 20 mm;2018 年 Poulton 等^[112]报道了一种基于硅基光学相控阵的激光雷达,该相控阵含有 512 个单元,可以用 2 μW 的功率实现 2π 的相位调制,该激光雷达探测范围大于 25 m。2019 年 Poulton 等^[113]报道的基于硅基光波导光学相控阵的激光雷达,实现了小于 30 μs 的偏转用时,能够以每秒 10 幅的帧率在 200 m 的距离内进行探测。

VCSEL 在面阵式激光雷达中也有应用。如果直接将扫描式的激光发射模块以阵列排布会占用极大的体积,成本也相对较高。VCSEL 器件有较小的封装体积和较高的发射能量,非常符合面阵式激光雷达的应用需求。2019 年 Fujioka 等^[114]报道了一种基于 VCSEL 的非机械扫描激光雷达,该器件在 20 m 探测距离处的深度测量精度为 30 cm,并且具有通过提高激光功率增大探测距离的潜力;2020 年该团队^[115]在以前的基础上进行改进,实现了 40 m 的探测范围以及 22 cm 的深度测量精度。

3.6 无掩模光刻

光刻是现代半导体工业的最重要也是最复杂的工艺技术,是指在光照的作用下,将掩模图案转移到硅晶片上,整个过程类似于胶卷的曝光。传统的光刻工艺是掩模光刻,即先制作一张包含工艺图案的掩模板,然后经过曝光并利用光刻胶将图案固定在晶圆上。在芯片制造工艺流程中,需要经过多次曝光环节,也就需要制作不同的掩模板,制作成本和工艺复杂度也较高。基于结构光技术,直接将曝光光束调制为所需要的工艺图案,可以省去掩模板的制作环节,并且可以通过编程改变曝光投射图案,极大地降低成本^[116]。

1997 年, Bertsch 等^[117]利用 LCD 作为掩模板进行了立体光刻实验,该光刻系统使 LCD 垂直于基板表面移动,从而能够逐层对基板进行不同图案的光刻,光刻层数最高可达数百层。2005 年, Jeon 等^[118]报道了一种无掩模光刻系统,基于 64×64 个微型紫外 LED 组成的 LED 阵列,通过合理的透镜组合将每个 LED 的光准直为直径为 8 μm 的光束,该 LED 阵列可以独立寻址,同时集成了曝光光源和掩模板功能,实现了最小直径为 16 μm 的圆盘形状刻蚀。同年, Sun 等^[119]基于 DMD 器件实现了无掩模光刻,制作了网状、棒状和螺旋状的微型立体结构,光刻层数最大为 110,最小的特征尺寸仅为 0.6 μm 。2014 年,南京航空航天大学的

Zhong 等^[120]提出了连续浮雕光刻技术,使用一个基于 DMD 的实时无掩模光刻系统,通过精确控制每次曝光的时间以及光刻胶的剂量实现了连续光刻,从而克服了分层光刻时需要多次对准的缺点。2019 年, Dinh 等^[121]开发了基于 DMD 器件的新型无掩模光刻系统,该系统在光路中加入了一个针孔阵列,提高了经过 DMD 反射后的光束质量,实现了最小尺寸为 3.36 μm 的复杂图案光刻。

3.7 应用场景总结

在显示投影领域,为了满足人眼直接观察的需求,必须使用振幅调制型结构光器件。对于振幅调制型结构光器件,器件集成度以及生产成本是主要的器件参数,因此首先考虑调制单元小、间隙窄的器件,如 LCD、OLED 阵列、DMD 等。显微成像、鬼成像以及结构光三维成像等技术一般需要使用结构光器件向物体投射多幅光场图案,结构光场的调制速度是重要参数,直接影响成像速度。因此该领域的研究热点从 LCD、DMD 逐渐转向 LED 阵列、VCSEL 阵列以及硅基光学相控阵等调制速度更快的结构光器件。在激光雷达的应用中,结构光器件主要用于光束的转向,因此对于相位调制型器件,相位调制速度以及相位调制效率是需要关心的主要参数。基于各种材料的光学相控阵是线阵激光雷达的研究热点,VCSEL 阵列则更符合面阵激光雷达的性能需求。在无掩模光刻技术中,需要结构光场具有较高的准直度,而该技术需要的调制速度较低,因此常用 LCD、DMD 等器件。

4 结 论

本文从不同光场参量调制的角度,分类介绍了多种高速结构光器件的工作原理、基本结构以及主要性能指标。常用的振幅调制型器件如 DMD、LCD 较为成熟、集成度较高,但调制速度不快;直接调制型器件如 LED 阵列、VCSEL 阵列的调制速度较快,但是工艺不够成熟,在空间分辨率和寻址方式上有待进一步发展;相位调制型器件如 LC-SLM 的调制速度略慢于 DMD 器件;基于 PLZT、铁电液晶等材料的相位调制器件的调制速度快,有很大的发展潜力;硅基光学相控阵是近年来新兴的结构光器件,有较小的体积和较高集成度;基于 MEMS 技术的 GLV 器件的调制速度快,但是目前仅是一维阵列结构。

本文还介绍了依托各种高速结构光器件实现的技术,展示了结构光器件性能在这些应用场景下的重要意义。可以看出:一方面,这些领域使用结构光器件实现了技术突破和发展;另一方面,技术的应用需求又反过来推动结构光器件的性能升级。器件与应用技术的发展是相辅相成的,不同领域之间的技术也需要相互借鉴学习。

参 考 文 献

- [1] Lechner B J, Marlowe F J, Nester E O, et al. Liquid crystal matrix displays[J]. Proceedings of the IEEE,

- 1971, 59(11): 1566-1579.
- [2] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [3] Logie B J. Apparatus for transmitting views or images to a distance: US1699270[P]. 1929-01-15.
- [4] Olsen F O, Gong H, Bagger C. CO₂ laser beam caustic measurement with focal spot analyser[C]//ICALEO® 2005: 24th International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication, October 31-November 3, 2005, Miami, Florida, USA, 2005.
- [5] Shelefontyuk D I. A mechanical light chopper based on a hard disk drive for systems of laser sounding of the atmosphere[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2011, 54(3): 414-417.
- [6] Kawashima S, Shishido H, Oshita S, et al. 18-5: a 1058-ppi 4K ultrahigh-resolution and high aperture LCD with transparent pixels using OS/OC technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 242-245.
- [7] 钱慰宗. 显示器件综述[J]. *计算机应用*, 2006, 26(8): 1963-1967, 1971.
Qian W Z. Short guide to the display devices[J]. *Journal of Computer Applications*, 2006, 26(8): 1963-1967, 1971.
- [8] Fan F, Yao L S, Wang X Q, et al. Ferroelectric liquid crystal Dammann grating by patterned photoalignment[J]. *Crystals*, 2017, 7(3): 79.
- [9] Hanaoka K, Katayama T, Higashida S, et al. 13-2: novel pixel design in-plane super-fast response (ip-SFR) LCD for smartphone and PC monitor[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 164-167.
- [10] Wu S T, Wu C S. High speed nematic liquid crystal modulators[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1991, 207(1): 1-15.
- [11] Sampell J B. Digital micromirror device and its application to projection displays[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1994, 12(6): 3242-3246.
- [12] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4985: 14-25.
- [13] Ren Y X, Lu R D, Gong L. Tailoring light with a digital micromirror device[J]. *Annalen Der Physik*, 2015, 527(7/8): 447-470.
- [14] Hornbeck L J. Current status of the digital micromirror device (DMD) for projection television applications[C]// *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting*, December 5-8, 1993, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 1993: 381-384.
- [15] ViALUX. Information about Hi-Speed V-Modules[EB/OL]. (2022-05-13)[2022-05-18]. <https://www.vialux.de/en/hi-speed-v-modules.html>.
- [16] Chandrasekaran S N, Ligtenberg H, Steenbergen W, et al. Using digital micromirror devices for focusing light through turbid media[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8979: 897905.
- [17] Doherty D, Hewlett G. Pulse width modulation control in DLP projectors[J]. *TI Technical Journal*, 1998, 15(3): 115-121.
- [18] Hueck K, Mazurenko A, Luick N, et al. Note: suppression of kHz-frequency switching noise in digital micro-mirror devices[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(1): 016103.
- [19] Scholes S, Kara R, Pinnell J, et al. Structured light with digital micromirror devices: a guide to best practice[J]. *Optical Engineering*, 2019, 59(4): 041202.
- [20] Narag J P C, Zambale N A F, Hermosa N. Scale distortion correction of a digital micromirror device using diffraction caustics[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106122.
- [21] Zhang Y J, Surman P, He S L. A resolution-enhanced digital micromirror device (DMD) projection system[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 78153-78164.
- [22] Ning C Z. Semiconductor nanolasers and the size-energy-efficiency challenge: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 014002.
- [23] Shen C C, Hsu T C, Yeh Y W, et al. Design, modeling, and fabrication of high-speed VCSEL with data rate up to 50 Gb/s[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 276.
- [24] Li R X, Hu S T, Gu X D, et al. Solid-state slow-light beam scanner with ultra-large field of view and high resolution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(6): 1855-1861.
- [25] Guo X, Graff J W, Schubert E F. Photon-recycling for high brightness LEDs[J]. *Compound Semiconductor*, 2000, 6: 1-4.
- [26] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [27] Tian P F, McKendry J J D, Gong Z, et al. Characteristics and applications of micro-pixelated GaN-based light emitting diodes on Si substrates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(3): 033112.
- [28] Tian C, Guo S X, Liang J Q, et al. Effects of unit size on current density and illuminance of micro-LED-array [J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(2): 84-89.
- [29] Lan H Y, Tseng I C, Lin Y H, et al. High-speed integrated micro-LED array for visible light communication[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2203-2206.
- [30] Joo W J, Kyoung J, Esfandyarpour M, et al. Metasurface-driven OLED displays beyond 10,000 pixels per inch[J]. *Science*, 2020, 370(6515): 459-463.
- [31] Park C I, Seong M, Kim M A, et al. World's first large size 77-inch transparent flexible OLED display[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(5): 287-295.
- [32] Forbes A, Dudley A, McLaren M. Creation and detection of optical modes with spatial light modulators [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(2):

- 200-227.
- [33] Engström D, O'Callaghan M J, Walker C, et al. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [34] Linnenberger A, Serati S, Stockley J. Advances in optical phased array technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6304: 63040T.
- [35] Xun X D, Cho D J, Cohn R W. Spiking voltages for faster switching of nematic liquid-crystal light modulators [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 3136-3143.
- [36] Yan J, Li Y, Wu S T. High-efficiency and fast-response tunable phase grating using a blue phase liquid crystal[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1404-1406.
- [37] Dayton D, Browne S, Gonglewski J, et al. Characterization and control of a multielement dual-frequency liquid-crystal device for high-speed adaptive optical wave-front correction[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(15): 2345-2355.
- [38] 齐梦娇, 王启东, 穆全全, 等. 驱动电压对液晶空间光调制器响应时间影响的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 092302.
- Qi M J, Wang Q D, Mu Q Q, et al. Study of response time depending on driving voltage of liquid crystal spatial light modulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 092302.
- [39] 蔡冬梅, 薛丽霞, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(11): 19-23.
- Cai D M, Xue L X, Ling N, et al. Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 19-23.
- [40] Harris S R. Numerical optimization of the performance of nematic liquid crystal optical phased arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5162: 157-171.
- [41] Goldring D, Zalevsky Z, Goldenberg E, et al. Optical characteristics of the compound PLZT[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(32): 6536-6543.
- [42] Thomas J A, Fainman Y. Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(26): 6196-6212.
- [43] 董作人, 叶青, 瞿荣辉, 等. 基于掺镧锆钛酸铅电光材料的光学相控阵光束扫描器[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 373-377.
- Dong Z R, Ye Q, Qu R H, et al. Optical phased-array beam deflector based on lead lanthanum zirconate titanate electro-optic ceramic[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(3): 373-377.
- [44] van Acoleyen K, Bogaerts W, Jágerská J, et al. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1477-1479.
- [45] Zhao C, Peng C, Hu W W. Blueprint for large-scale silicon optical phased array using electro-optical micro-ring pixels[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17727.
- [46] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [47] Abediasl H, Hashemi H. Monolithic optical phased-array transceiver in a standard SOI CMOS process[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6509-6519.
- [48] Poulton C V, Byrd M J, Moss B, et al. 8192-element optical phased array with 100° steering range and flip-chip CMOS[C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [49] Corrigan R W, Amm D T, Gudeman C S. Grating light valve technology for projection displays[C]//International Display Workshop, January, 1998, Kobe, Japan. [S.l.: s.n.], 1998: 757-760.
- [50] Payne A, Myatt G, Hunter J, et al. An 8192-channel grating light valve for ultra-violet direct write lithography [C]//2012 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, August 6-9, 2012, Banff, AB, Canada. New York: IEEE Press, 2012: 188-189.
- [51] Murthy S, Anish S V, Sundaravadivelu S. Overview and applications of Grating Light Valve™ based image acquisition and projection display system[C]//2015 International Conference on Signal Processing and Communication Engineering Systems, January 2-3, 2015, Guntur, India. New York: IEEE Press, 2015: 296-300.
- [52] Tzang O, Niv E, Singh S, et al. Wavefront shaping in complex media with a 350 kHz modulator via a 1D-to-2D transform[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(11): 788-793.
- [53] Cho J, Santhanam S, Le T, et al. Design, fabrication, switching, and optical characteristics of new magneto-optic spatial light modulator[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(3): 1910-1919.
- [54] Aoshima K I, Funabashi N, Machida K, et al. Submicron magneto-optical spatial light modulation device for holographic displays driven by spin-polarized electrons[J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(9): 374-380.
- [55] Schwartz A, Wang X Y, Warde C. Electron-beam-addressed microchannel spatial light modulator[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(1): 241119.
- [56] Tian B, van Etten W, Beuwer W. Ultrafast all-optical shift register and its perspective application for optical fast packet switching[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(3): 722-728.
- [57] 李继军, 聂晓梦, 李根生, 等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 695-710.
- Li J J, Nie X M, Li G S, et al. Comparison and research progress of flat panel display technology[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 695-710.
- [58] Fung K, Waller C, Eisenbrandt E, et al. 32.1: invited paper: Q-view: a compression technology for UHD resolution, low power, and low cost LCOS panels[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 342-344.
- [59] 陈晓西, 李光勇, 王继岷, 等. 基于液晶多层屏的 3D 显示系统和算法设计[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(4): 302-307.
- Chen X X, Li G Y, Wang J M, et al. Liquid crystal multi-layer 3D display system and algorithm design[J].

- Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(4): 302-307.
- [60] Bao X Z, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Design and fabrication of AlGaInP-based micro-light-emitting-diode array devices[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 34-41.
- [61] Kubota S R. The grating light valve projector[J]. Optics and Photonics News, 2002, 13(9): 50-53.
- [62] Kikuchi H, Hashimoto S, Tajiri S, et al. High-pixel-rate grating-light-valve laser projector[J]. Journal of the Society for Information Display, 2009, 17(3): 263-269.
- [63] Neil M A, Juskaitis R, Wilson T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope[J]. Optics Letters, 1997, 22(24): 1905-1907.
- [64] Gustafsson M G L. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy[J]. Journal of Microscopy, 2000, 198(2): 82-87.
- [65] Gustafsson M G L. Nonlinear structured-illumination microscopy: wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(37): 13081-13086.
- [66] Kner P, Chhun B B, Griffis E R, et al. Super-resolution video microscopy of live cells by structured illumination [J]. Nature Methods, 2009, 6(5): 339-342.
- [67] Huang X S, Fan J C, Li L J, et al. Fast, long-term, super-resolution imaging with Hessian structured illumination microscopy[J]. Nature Biotechnology, 2018, 36(5): 451-459.
- [68] Guo Y T, Li D, Zhang S W, et al. Visualizing intracellular organelle and cytoskeletal interactions at nanoscale resolution on millisecond timescales[J]. Cell, 2018, 175(5): 1430-1442.
- [69] Dan D, Lei M, Yao B L, et al. DMD-based LED-illumination super-resolution and optical sectioning microscopy[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1116.
- [70] Descloux A, Müller M, Navikas V, et al. High-speed multiplane structured illumination microscopy of living cells using an image-splitting prism[J]. Nanophotonics, 2019, 9(1): 143-148.
- [71] Liao J L, Liu L N, Chen T G, et al. Comparison of two- and three-beam interference pattern generation in structured illumination microscopy[J]. Photonics, 2021, 8(12): 526.
- [72] Franch N, Canals J, Moro V, et al. Towards a super-resolution structured illumination microscope based on an array of nanoLEDs[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 111105: 110050O.
- [73] Helle Ø I, Dullo F T, Lahrberg M, et al. Structured illumination microscopy using a photonic chip[J]. Nature Photonics, 2020, 14(7): 431-438.
- [74] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. Physical Review A, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [75] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(14): 141123.
- [76] Shi D F, Feng W, Huang J, et al. Compressed polarimetric ghost imaging of different material's reflective objects[J]. Optical Review, 2015, 22(6): 882-887.
- [77] Song L J, Zhou C, Chen L, et al. Demonstration of single pixel computational ghost imaging with pseudo-randomly patterned illumination from a liquid crystal display[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10141: 101411G.
- [78] Zhang Z B, Su Z J, Deng Q W, et al. Lensless single-pixel imaging by using LCD: application to small-size and multi-functional scanner[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3731-3745.
- [79] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6065: 43-52.
- [80] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. Science, 2013, 340(6134): 844-847.
- [81] Phillips D B, Sun M J, Taylor J M, et al. Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling [J]. Science Advances, 2017, 3(4): e1601782.
- [82] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 12029.
- [83] Komatsu K, Ozeki Y, Nakano Y, et al. Ghost imaging using integrated optical phased array[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [84] Kohno Y, Komatsu K, Tang R, et al. Ghost imaging using a large-scale silicon photonic phased array chip[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3817-3823.
- [85] Li L J, Chen W, Zhao X Y, et al. Fast optical phased array calibration technique for random phase modulation LiDAR[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 6900410.
- [86] Huang H X, Li L J, Ma Y X, et al. 25, 000 fps computational ghost imaging with ultrafast structured illumination[J]. Electronic Materials, 2022, 3(1): 93-100.
- [87] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
- Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [88] Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Generation of surface contours by moiré patterns[J]. Applied Optics, 1970, 9(4): 942-947.
- [89] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [90] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. Applied

- Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [91] Huang P S, Zhang C P, Chiang F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. Optical Engineering, 2003, 42(1): 163-168.
- [92] Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 123601.
- [93] Griesser A, Koninckx T P, van Gool L. Adaptive real-time 3D acquisition and contour tracking within a multiple structured light system[C]//12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2004. PG 2004. Proceedings, October 6-8, 2004, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2004: 361-370.
- [94] Gong Y Z, Zhang S. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector[J]. Optics Express, 2010, 18(19): 19743-19754.
- [95] Grosse M, Buehl J, Babovsky H, et al. 3D shape measurement of macroscopic objects in digital off-axis holography using structured illumination[J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1233-1235.
- [96] Wissmann P, Forster F, Schmitt R. Fast and low-cost structured light pattern sequence projection[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24657-24671.
- [97] Heist S, Mann A, Kühmstedt P, et al. Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement[J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 112208.
- [98] Heist S, Lutzke P, Dietrich P, et al. Experimental comparison of laser speckle projection and array projection for high-speed 3D measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9525: 282-289.
- [99] Hyun J S, Chiu G T C, Zhang S. High-speed and high-accuracy 3D surface measurement using a mechanical projector[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1474-1487.
- [100] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, et al. Micro Fourier Transform Profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10, 000 frames per second[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 102: 70-91.
- [101] Li R X, Hu S T, Gu X D, et al. Demonstration of real-time structured-light depth sensing based on a solid-state VCSEL beam scanner[J]. Optics Express, 2021, 30(1): 364-376.
- [102] Huang X, Bai J, Wang K W, et al. Target enhanced 3D reconstruction based on polarization-coded structured light [J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1173-1184.
- [103] Zhu Z M, Xie Y L, Cen Y G. Polarized-state-based coding strategy and phase image estimation method for robust 3D measurement[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4307-4319.
- [104] Zhu Z M, You D D, Zhou F Q, et al. Rapid 3D reconstruction method based on the polarization-enhanced fringe pattern of an HDR object[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2162-2171.
- [105] McManamon P. Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 060901.
- [106] Stone W C, Juberts M, Dagalakis N, et al. Performance analysis of next-generation LADAR for manufacturing, construction, and mobility[R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2004.
- [107] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. Colorado: Roberts & Company Publishers, 1969.
- [108] Smith B, Hellman B, Gin A, et al. Single chip lidar with discrete beam steering by digital micromirror device[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14732-14745.
- [109] Hellman B, Luo C, Chen G H, et al. Single-chip holographic beam steering for lidar by a digital micromirror device with angular and spatial hybrid multiplexing[J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21993-22011.
- [110] Wu L, Wang X R, Xiong C D, et al. Polarization-independent two-dimensional beam steering using liquid crystal optical phased arrays[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(10): 101601.
- [111] Poulton C V, Yaacobi A, Cole D B, et al. Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4091-4094.
- [112] Poulton C V, Russo P, Timurdogan E, et al. High-performance integrated optical phased arrays for chip-scale beam steering and LiDAR[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2018: ATu3R.2.
- [113] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 7700108.
- [114] Fujioka I, Li R X, Ho Z, et al. Time of flight 3D imaging using VCSEL beam scanner[C]//2019 24th Microoptics Conference (MOC), November 17-20, 2019, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2019: 88-89.
- [115] Fujioka I, Ho Z, Gu X D, et al. Solid state LiDAR with sensing distance of over 40 m using a VCSEL beam scanner[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, DC: OSA, 2020: SM2M.4.
- [116] 周子逸, 董贤子, 郑美玲. 数字微镜无掩模光刻技术进展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922030.
- Zhou Z Y, Dong X Z, Zheng M L. Evolution and application of digital micromirror device based maskless photolithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922030.
- [117] Bertsch A, Zissi S, Jézéquel J Y, et al. Microstereolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator[J]. Microsystem Technologies, 1997, 3(2): 42-47.
- [118] Jeon C W, Gu E, Dawson M D. Mask-free photolithographic exposure using a matrix-addressable micropixelated AlInGaN ultraviolet light-emitting diode [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(22): 221105.
- [119] Sun C, Fang N, Wu D M, et al. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic

- mask[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 121 (1): 113-120.
- [120] Zhong K J, Gao Y Q, Li F, et al. Fabrication of continuous relief micro-optic elements using real-time maskless lithography technique based on DMD[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 367-371.
- [121] Dinh D H, Chien H L, Lee Y C. Maskless lithography based on digital micromirror device (DMD) and double sided microlens and spatial filter array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 407-415.

约稿专家简介:



孙鸣捷(1982—), 博士, 教授/博导, “国家优秀青年科学基金”获得者。2004年和2010年分别获浙江大学光电信息工程学系信息工程(光电)学士和光学工程博士学位, 2010年进入北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院工作。现任北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院院长助理, 光电工程系主任。长期从事先进光电成像研究, 发表 *Science Advances*、*Nature Communications* 等多篇 ESI 高被引论文, 这些成果被“麻省理工技术评论”重点报道为相关领域里程碑成果, 有潜力改变未来成像系统的工作模式。主持国家自然科学基金企业联合重点基金、国家重点专项等 10 余项国家重大项目。E-mail: mingjie.sun@buaa.edu.cn。